

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Füüsika instituut

Karl Reinkubjas

**SPEKTRAALSE REFLEKTOMEETRIA KASUTAMINE
OPTILISE KIU KAITSEKIHI PAKSUSE MÄÄRAMISEKS**

Füüsika eriala
Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendajad:
Heli Lukner Ph.D
Sandhra-Mirella Valdma MSc.

Tartu 2017

Spektraalse reflektomeetria kasutamine optilise kiu kaitsekihi paksuse määramiseks

Optilised kiud on laialt kasutuses näiteks telekommunikatsioonis ja meditsiinis. Jõudsalt laieneb optiliste kiudude kasutamine erinevates rakendustes: aktiivkeskkonnana superkontiinumlasertes, sensoritena, fotokeemias jne. Optilise kiu mehaanilise tugevuse tagamiseks on oluline, et kaitsekihi paksus oleks ühtlane kogu kiu ulatuses. Sellest lähtuvalt on tööstuses vajadus mõõteseadme järele, mis võimaldab määrata kaitsekihi paksust suurema täpsusega kui üks mikromeeter ja seda mitteinvasiivselt. Käesoleva töö eesmärgiks oli uurida spektraalse reflektomeetria rakendatavust optiliste kiudude kaitsekihi paksuse määramiseks. Meetodi aluseks oli, et õhukeselt kihilt tagasipeegeldunud valguse spektrisse tekib modulatsioon, mis on pöördvõrdeline kihi paksusega. Selle meetodi kontrollimiseks konstrueeriti katseseade optiliste kiudude kaitsekihi paksuse uurimiseks. Käesolevas töös leiti, et spektraalse reflektomeetriaga on võimalik määrata optilise kiu kaitsekihi paksust usaldusväärselt, kuid tööstuses rakendamiseks on vaja teha täiendavaid uuringuid. Samuti tehti kindlaks, et optiliste kiudude kaitsekihi paksus on väga ebahühtlane, kinnitades probleemi olemasolu.

CERCS: P200 Elektromagnetism, optika, akustika

Märksõnad: optiline kiud, spektraalne reflektomeetria, koherentsikaardistamine

Spectral reflectometry for optical fiber protective layer thickness measurement

Optical fibers are extensively used in telecommunications and medicine. Speciality optical fibers are growing in importance as these are more and more used in different applications for example supercontinuum generation in lasers, sensors, photochemistry etc. For structural integrity it is very important to have an uniform protective layer. There is a necessity for equipment to determine the thickness of the layer with an accuracy more than one micrometer. The purpose of this work is to examine the possibility to use spectral reflectometry for optical fiber protective layer thickness measurement. Spectral reflectivity analyzes the modulation in reflected light, which is inverse of the thickness of the measured layer. An experimental setup to verify the applicability of the method was constructed and the thickness of protective layer of test fibers was determined experimentally. In this work it was shown that the method is suitable for measuring the thickness of the protective layer. Also the experiment concluded that the protective layer of our samples is uneven thus proving the severity of the problem.

CERCS: P200 Electromagnetism, optics, acoustics

Keywords: optical fiber, spectral reflectometry, coherence mapping

Sisukord

Sissejuhatus	4
1 Kirjanduse ülevaade	5
1.1 Valgus ja selle omadused	5
1.1.1 Peegeldumine ja murdumine	6
1.1.2 Interferents	7
1.1.3 Koherents	9
1.2 Õhukesed kiled	9
1.2.1 Kilede paksuse määramine	10
1.3 Optiline kiud	10
2 Meetodid	12
2.1 Seadmed optilises süsteemis	12
2.2 Optilise skeemi üldkirjeldus	14
2.3 Uuritava objekti paksuse arvutamine	16
2.4 Tasapinnalise objekti paksuse mõõtmine	17
2.5 Optilise kiu kaitsekihi paksuse määramine	18
3 Tulemused ja analüüs	19
3.1 Tasapinnalise objekti paksuse määramine	20
3.2 Optilise kiu kaitsekihi paksuse mõõtmine staatilise kiu korral	22
3.3 Soovitused ja hinnang meetodi edasiarendamiseks	23
Kokkuvõte	25
Tänuavaldused	26
Kasutatud kirjandus	27
Lihtlitsents	29

Sissejuhatus

Ülipuhtast klaasist valmistatud optiliste kiududega on võimalik transportida valgust mitmete kilomeetrite taha või muuta valguse omadusi, näiteks polarisatsiooni ja spektrit. Telekommunikatsioonis, meditsiinis ja teaduses on optilised kiud teinud võidukäigu ning leiavad rakendust väga laialiselt [1]. Lisaks eelnimetatud valdkondadele kasutatakse optilisi kiude ka mitmel pool mujal : painde-, temperatuuri-, ja rõhusensoritena [2], fotokeemias [3], superkontinuumlaserites aktiivkeskkonnana [4] ning mitmel pool mujal. Nimetatud rakendustes kasutatakse eriotstarbelisi kiudusid, mille mõõtmed ja koostis ei pruugi vastata üldlevinud standarditele.

Tootjad nendivad, et ebastandardsete kiudude tootmisel on ülimalt oluline tagada peale kantava õhukese kaitsekihi ühtlane paksus. Sellest tulenevalt on vajadus kergesti käsitsetavate ja kättesaadava hinnaga mõõteseadmete järele, mis võimaldavad määrata kaitsekihi paksust suurema täpsusega kui 1 mikromeeter. See peab toimuma tootmise käigus kiudu lõhkumata ehk mitteinvasiivselt.

Käesolevas töös uuriti laia spektriga ruumiliselt koherentse valguse kasutamist optilise kiu kaitsekihi paksuse määramiseks spektraalse reflektomeetriaga [5]. Selle saavutamiseks koostati mõõteskeem, mis võimaldas määrata kaitsekihi paksust tagasipeegeldunud valguse spektrisse tekkivast modulatsioonist. Saadud tulemusi kontrolliti koherentsikaardistamise meetodiga. Viimati nimetatud meetodi korral kasutatakse valge valguse interferentsi omadust, et interferentspildi tekkimiseks peab käiguvahe olema pikisuunalise koherentsiteepikkuse ehk mõne lainepikkuse suurusjärgus.

Töö on jaotatud kolmeks. Esimeses osas antakse ülevaade valguse ning selle omaduste kohta; ülevaade õhukestest kiledest ning erinevatest paksuse mõõtmise meetoditest ja optiliste kiudude tootmisest. Töö teine osa on kasutatava meetodi kirjeldus, kus mainitakse ära mõõdetud objektid ning nende parameetrid. Ära on toodud ka mõõtmiseks kasutatava skeemi ja aparatuuri kirjeldus. Viimane ehk kolmas peatükk on mõõtmiste käigus saadud tulemuste esitlemine ja analüüsimine. Sealjuures esitatakse soovitused ja ideed, mida oleks vaja täpsustada ning lisaks uurida, et meetodit rakendada tööstuses.

Peatükk 1

Kirjanduse ülevaade

Käesolevas peatükis antakse üldine ülevaade töö mõistmiseks vajalikest teemadest. Alustatakse valgusest ja selle põhilistest omadustest. Käsitletakse valgust kui elektromagnetlainet ning selle peegeldumist, murdumist ja interferentsi. Valguse teema lõpus seletatakse koherentsi mõistet ja selle tähtsus valguse kasutamisel.

Lühike ülevaade antakse õhukestest kiledest ning meetoditest, millega on võimalik kilede paksusi mõõta. Töös uuriti esmalt tasapinnalisi kilesid ning seejärel kiu kattekihiks olevat kilet, millel on silindriline geomeetria. Mainitakse ära mõned meetodid, mida kasutatakse paksuse mõõtmiseks, kuid tulenevalt erinevatest piirangutest ei ole võimalik kasutada optilise kiu korral.

Viimasena antakse ülevaade optiliste kiudude ehitusest ja tootmisprotsessist. Käesolevas töös piirduakse ainult astmeliselt muutuva murdumisnäitajaga optiliste kiudude uurimisega.

1.1 Valgus ja selle omadused

Valgus on elektromagnetlaine, mille käitumist kirjeldavad Maxwelli võrrandid. Nende võrrandite laineline lahend annab 3-ruumis disperseerivas keskkonnas tulemuseks

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \exp\left(-\frac{i2\pi\tilde{N}}{\lambda}\vec{q}\vec{r}\right) \exp(-i\omega t), \quad (1.1)$$

kus \vec{r} on kohavektor, λ lainepikkus, \vec{E}_0 elektriväljatugevuse vektor, \vec{q} laine levimine suunaline ühikvektor, \tilde{N} kompleksne murdumisnäitja, ω ringsagedus ja i imaginaararv. [5]

Mitte kõik elektromagnetlained ei ole valgus. Lähtuvalt lainepikkusest vaakumis on alumiseks piiriks ultraviolet (UV) kiirgus lainepikkusega suurusjärgus $\lambda = 5 \text{ nm}$. Ülemiseks piiriks loetakse infrapuna (IR) lainepikkusega $\lambda = 40 \mu\text{m}$. Nimetatud piirid on kokkuleppelised. Eraldi eristatakse ka nähtava valguse vahemikkus, milleks on ca 400 nm kuni ca 750 nm. Reaalne silma tundlikus sõltub indiviidist. [6, 7]

Tulenevalt valguse suurest sagedusest, suurusjärgus 500 THz, ei ole võimalik mõõta valguslaine hetkelist amplituudi ehk elektrivälja tugevuse vektori pikkust. Üle aja keskmistava seadmega mõõdetakse valguse intensiivsust ehk pinnaühikut läbinud energia kogust. Intensiivsus on võrdeline elektrivälja tugevmuudes rakendustesuse ruuduga [5]

$$I \propto E_0^2 . \quad (1.2)$$

1.1.1 Peegeldumine ja murdumine

Valguse peegeldumist ning murdumist märgati eksperimentides ammu enne selle tähenduse mõistmist. Tänapäeval on need kaks nähtust aluseks geomeetrilisele optikale. Valguse levimist kirjeldatakse kõige üldisemalt kiirte abil, mis näitavad energia levimise suunda. Kasutades valguskiirte lähendust on võimalik paljudel juhtudel kõrvale jätta difraktsioonist tulenevad efektid. [6]

Kasutades valguskiire lähendust võib peegeldumisseaduse matemaatiliselt kirja panna

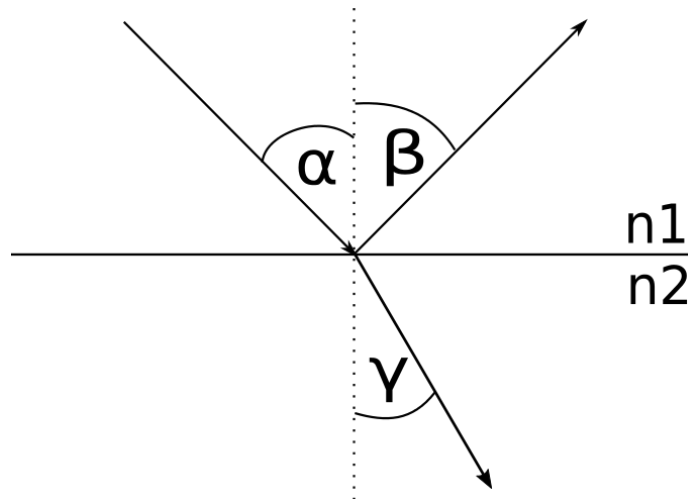
$$\alpha = \beta , \quad (1.3)$$

kus α on valguse langemisnurk pinna normaali suhtes ning β peegeldumisnurk sama normaali suhtes (joonis 1.1). Langev ja tagasipeegeldunud kiir on samas tasandis. [6]

Nagu varem nimetatud, on teiseks protsessiks valguse murdumine. Murdumisnurk sõltub läbitava aine murdumisnäitajast. Matemaatiliselt saab murdumisseaduse, tuntud ka kui Snelli seadus, kirja panna kujul

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} , \quad (1.4)$$

kus γ on murdumisnurk, n_1 esialgse keskkonna absoluutne murdumisnäitaja ja n_2 aine murdumisnäitaja (joonis 1.1). Peegeldumisel optiliselt tihedamalt keskkonnalt tekib



Joonis 1.1. Valguse peegeldumine ja murdumine kahe erineva murdumisnäitajaga keskkonna piirpinnalt. Tihedamasse keskkonda levides muutub kiire nurk normaali ja levimise sihi vahel väiksemaks.

faasihüpe π . [6]

Nimetatud valemid (1.3) ja (1.4) kirjeldavad valguskiire käiku, kuid ei määratle, kuidas jaguneb energia mõlema protsessi vahel.

1.1.2 Interferents

Tulenevalt lainete superpositsiooniprintsiibist tekib kahe või enama laine liitumisel interferents. Eristatakse kahte tüüpi interfrentsi: konstruktiivne, mille puhul lainete summa on suurem kui iga üksiku amplituud, ning destruktiivne, kus summa on väiksem kõige intensiivsema laine amplituudist. [6]

Valguslainete liitumisel 3-mõõtmelises ruumis tekib interferentspilt, kuid tulenevalt valguse omadusest peavad interferentspildi jälgimiseks olema mõlemad lained koherentsed. Koherentsete valguslainete saamiseks kasutatakse kahte meetodit: lainefroni või amplituudi jagamist. [6, 8]

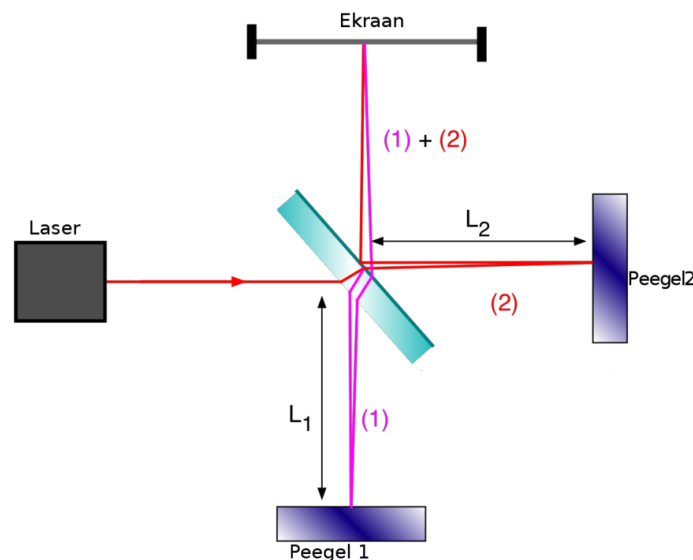
Lainefroni jagamise korral võetakse valgusallikast tulenev lainefront, mis jagatakse üheks või mitmeks osaks. Lainefroni osad suunatakse ühte ruumipunkti muutmata laine esialgest amplituudi. Ruumipunktis lained liituvad ja on võimalik jälgida interferentspilti. Ajalisest erinevusest tekkinud faasivahe määrab, kas lained liituvad konstruktiivselt või destruktiivselt. Tuntuim näide sellisest meetodist on Youngi kahe pilu katse, millega tõestati valguse lainelised omadused. Lisaks töötavad samal põhimõttel ka näiteks Fresneli biprisma ja Lloyd'i peegel. [7]

Amplituudi jagamise korral kasutatakse peegeldumist ja murdumist. Osa valgusest

peegeldub dielektrikul või poolpeeglil, ülejäänud osa läheb läbi aine. Selliselt jagatud lainetel on vähendatud amplituud kuid ühised omadused. Juhtides mõlemad lained samasse ruumipunkti on võimalik jälgida interferentspilti, kui vahepeal on lainetele tekkinud käiguvahe. Kõige tuntum näide on Michelsoni interferomeeter. [6]

Michelsoni interferomeeter (joonis 1.2) on väga täpne mõõteriist. Lihtsa seadmega on võimalik määrata valguse lainepikkust täpsusega 0,1 nm ja õhu murdumisnäitajat kuue tüvenumbri täpsusega. [7]

Michelsoni interferomeetri korral saab eristada kahte tüüpi interferentspilti. Kui peeglid on täpselt omavahel risti ja valguskiir on hajuv tekib samakalde pilt. Tekkivas mustris on näha ringid. Ringid tulenevad sellest, et teljest eemale liikudes tekib käiguvahe. Kui peeglite vaheline nurk on natuke erinev tekivad samapaksusribad. Selle korral saavad kaks lainet väljundis kokku väikese nurga all. [6]



Joonis 1.2. Michelsoni interferomeetris juhitakse laserist tulev valgus kiirejagajale ning jaotatakse kaheks. Esimene osa (1) läbib õla pikkusega L_1 ja peegeldub peeglilt 1 tagasi kiirejagajale. Teine osa (2) läbib õla pikkusega L_2 ning peegeldub peeglilt 2. Pärast teistkordset kiirejagaja läbimist jõuavad kiired (1) ja (2) ühtsesse väljundisse. [9]

Interferentspilti on võimalik jälgida ka valge valgusega. Pilt on jälgitav ainult juhul, kui käiguvahe ei ole suurem koherentsi teepikkusest. Laia spektri korral on koherentsi teepikkus lainepikkusega samas suurusjärgus. [6, 7]

Interferentspildi nähtavus on defineeritud kui

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (1.5)$$

kus I_{\max} on interferentspildi maksimumi intensiivsus ja I_{\min} miinimumi intensiivsus. [6]

1.1.3 Koherents

Igal optilisel väljal toimuvad eritüübilised fluktuatsioonid. Üldiselt võib öelda, et koherentsiteooria tegeleb fluktuatsioonide statistilise kirjeldamisega. Optilised koherentsi nähtused ei ole mitte midagi muud kui seosed nende vahel. Koherentsi on väga pikalt seostatud interferentsiga. See tuleneb sellest, et interferents on kõige lihtsam protsess, mis võimaldab jälgida kahe valguslaine vahelist mõju. Välja on töötatud spetsiifilisi detektoreid ning elektroonikaskeeme, mis võimaldavad täpsemalt uurida optiliste väljade koherentsi omadusi. [10]

Eristatakse kahte tüüpi koherentsi: ajaline ja ruumiline. Michelsoni interfereerimeetris avaldub interferentspildi nähtavus valemiga (1.5). Eksperimentaalselt on tõestatud, et nähtavus sõltub ka tekkivast käiguvahest. Katsetega on näidatud, et vahemikus $\tau < \tau_c$ on interferentspilt jälgitav ning vahemiks $\tau > \tau_c$ ei ole. Kriitilist väärtust τ_c nimetatakse koherentsiajaks ja seda saab leida eksperimentaalselt. Lähtudes Wiener-Khinchini teoreemist - korrelatsiooni funktsioon on sõltuv optilise välja võimsuse spektrist - saadakse seos

$$\tau_c = \frac{2\pi}{\Delta\omega}, \quad (1.6)$$

kus $\Delta\omega$ on eksperimentis kasutatava spektri laius. [11]

Youngi interfereerimeetris sõltub interferentspildi nähtavus aukude vahelisest kaugusest. Aukude vahelise kauguse suurenemisel pildi nähtavus väheneb. Seda koherentsi omadust nimetatakse ruumiliseks koherentsiks. Nagu ajalise koherentsi korral leidub ka ruumilise koherentsi korral kriitiline väärtus s_c ehk koherentsi raadius, millest kaugemal enam interferentspilt ei ole jälgitav. [11]

1.2 Õhukesed kiled

Õhukese kile all mõistetakse käesolevas töös alla nanomeetri kuni mitmesaja mikromeetri paksust aine kihti. Nende tähtsus on viimase 50 aasta jooksul suuresti kasvanud. See on toimunud tänu vaakumtehnikate arengule, mis võimaldab kilesid toota ning elektron-optiliste uurimismeetodite arengule. Tänapäevaks kasutatakse õhukesi kilesid paljudes erinevates rakendustes. Näiteks optikas kasutatakse peegeldumisvastaste katetena, peegeldumisteguri suurendamiseks, polarisaatorina, interferentsfiltrina ja veel paljudeks muudeks otstarveteks. [12]

1.2.1 Kilede paksuse määramine

Kilede paksuse määramine on keeruline. Praktikas ei ole õhukesed kiled isotroopilised, homogeenised ja paralleelsete pindadega. Lisaks ei ole aluspinnad, millel kilesid toodetakse, matemaatilised tasandid. Tulenevalt nimetatud teguritest kasutatakse kilede iseloomustamiseks keskmist paksust üle mingi ala. Samuti kasutatakse ka kile paksuse väljendamiseks massi pinnaühiku kohta. [12]

Kilede paksust saab määrata kolme eri tüüpi meetoditega: (1) mehaanilised, (2) elektrilised ja (3) optilised meetodid. Mehaanilised meetodid on näiteks kaalumise ülitundlikke kaaludega. Selle meetodi miinuseks on keskmistamine üle väga suure ala ning mõõdetava objekti täpse pindala määramine on keeruline. Üheks elektriliseks meetodiks on takistuse mõõtmine. Üldiselt ei ole teada seos kile paksuse ja takistuse vahel. Ala, kus seda saab kasutada on mõõtes oksiid kihi paksuse kasvu metalli peal. [12]

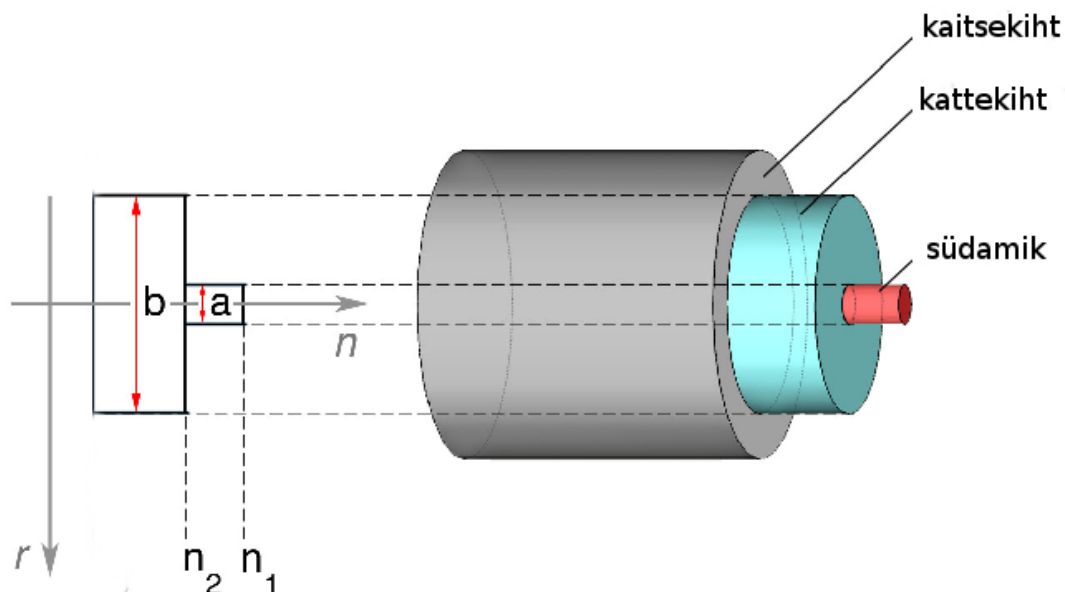
Laialt kasutatavad optilised meetodid kilede paksuse määramiseks on reflektomeetria ja ellipsomeetria. Reflektomeetria korral mõõdetakse valguskiire (enamasti monokromaatne) intensiivsust enne ja pärast mõõteobjektilt peegeldumist. Nende kahe intensiivsuse suhe on absoluutne peegeldumistegur. Praktikas mõõdetakse alati suhtelist peegeldumistegurit. Absoluutse väärtuse saamiseks kasutatakse tuntud peegeldumisteguriga etalone. Ellipsomeetria korral uuritakse polarisatsiooni muutust valguse peegeldumisel või läbimisel. Laialt on levinud reflektomeetria ning ellipsomeetria rakendused, kus kasutatakse laia spektriga valgusallikat. [5]

1.3 Optiline kiud

Lainejuht on struktuur, mis võimaldab juhtida valgust ühest ruumipunktist teise. Kõige levinum on astmeliselt muutuva murdumisnäitajaga optiline kiud. See koosneb silindrilisest dielektrilisest südamikust (*core*) ning madalama murdumisnäitajaga kattest (*cladding*). Matemaatiliselt saab seda väljendada [13]

$$n(r) = \begin{cases} n_1, & 0 < r < a & \text{südamik} \\ n_2, & a < r < b & \text{kattekiht} \end{cases} . \quad (1.7)$$

Kiu kaitsmiseks mehaaniliste vigastuste eest kaetakse see lisa kaitsva kihiga (*protective jacket*), mis on optiliselt eraldatud teistest kihtidest [14]. Kiu skematiline ehitus on toodud joonisel 1.3.



Joonis 1.3. Astmelise murdumisnäitajaga optilise kiu südamiku murdumisnäitaja n_1 on suurem kattekihi murdumisnäitajast n_2 . [15]

Enamasti on optilise kiu südamik tehtud dopeeritud ränist ning kaitsekiht puhtast ränist. Kihtide ühenduskohal toimub täielik sisepeegeldumine, mis tagab valguskiire levimise pika maa taha. Reaalse kiu puhul on murdumisnäitajad väga sarnased $n_1 \simeq 1,48$ ja $n_2 \simeq 1,46$. Ühemoodilise kiu jaoks on südamiku paksus $5 - 10\mu\text{m}$ ja mitmemoodilistel näiteks $50\mu\text{m}$. [13]

Optilise kiu tootmiseks võetakse seest õõnes klaastoru, mis on valmistatud ülipuhtast klaasist. Germaaniumiga dopeeritud räni sadestatakse toru sisepinnale. Kogu süsteemi kuumutatakse, et sadestatud räni kiht muutuks klaasiks. Kõrgel temperatuuri hakatakse toru pikaks venitama. Venitamine toimub kuni sisemine õõnsus kaob. Tegemist on eelvormiga, millest venitatakse ehk nn tõmmatakse optilisi kiude. Vormi kuumutatakse ning asetatakse tõmbamistorni. Tornist tõmmatakse vajaliku paksusega optiline kiud. Tõmbamisel jälgitakse suure täpsusega südamiku ja kattekihi paksuseid. [1]

Peatükk 2

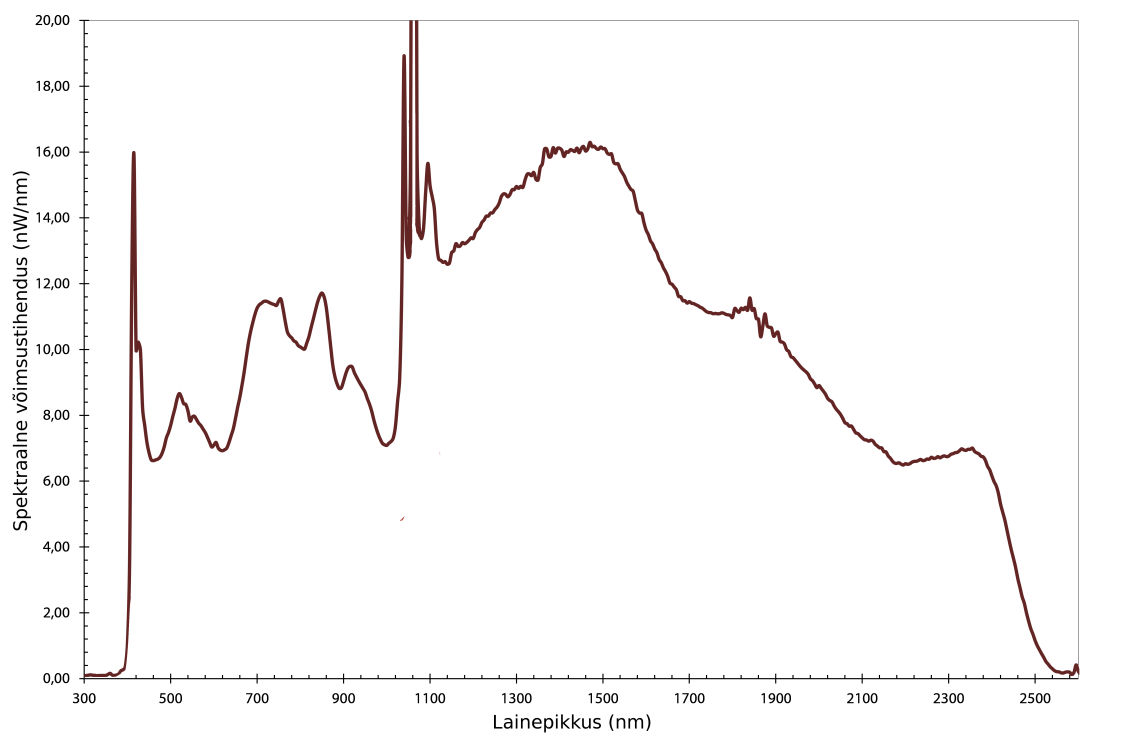
Meetodid

Peatükis kirjeldatakse töö eesmärgi saavutamiseks läbiviidud eksperimenti ja selle korraldust. Alustatakse seadmete kirjeldamisest optilises süsteemis, milleks olid valgelaser ja spektromeeter. Mõlema kohta tuuakse välja töös kasutusel olnud seaded. Teisena antakse ülevaade optilistest skeemidest, mis olid kasutusel spektraalse reflektomeetria ning koherentsikaardistamise jaoks. Selgitatakse, kuidas toimus mõõtmisprotsess, ning mis moodi mõõdetud andmetest arvutatakse soovitud suurused. Viimases kahes alapeatükis tuuakse välja kasutatud tasapinnalised katseobjektid ning optilised kiud ja nende parameetrid.

2.1 Seadmed optilises süsteemis

Valgelaser

Katse läbiviimiseks kasutati laia spektriga ruumiliselt koherentset valgusallikat. Selleks kasutati käesolevas töös ettevõtte NKT Photonics valgelaserit Fianium Whitelase WL-SC-400-40. Nimetatud seadme puhul on tegemist superkontiinum pikosekund impulsslaseriga, mille väljundspekter katab nähtava ja lähi-infrapuna piirkonna vahemikus 400 nm - 2400 nm [16]. Tootja poolt mõõdetud spekter on nähtav joonisel 2.1. Esialgu teostati mõõtmised kordussagedusel 1 MHz ja võimsusel 100%. See on umbes 5% laseri koguvõimsusest. Aja jooksul laseri tingimused muutusid ning sama intensiivse laserkiire jaoks oli vaja kasutada kordussagedust 5 MHz.



Joonis 2.1. Eksperimendis kasutatava ruumiliselt koheretse valge valguse impulsslaseri spekter. [16].

Spektromeeter

Spektrite mõõtmiseks kasutati ettevõtte BWTEK poolt toodetud spektromeetrit BTC111E TE. Tegemist on arvutijuhitava 16-bitise CCD-elementidega spektromeetriga. Seadme lahutusvõime on 0,51 nm ja mõõtepiirkond 389,95 nm - 900,26 nm. Antud mõõtepiirkond määrab eksperimendis efektiivselt kasutatava spektri.

Valgus juhitakse seadmesse komplektis oleva optilise kiuga. Lisaks on seadmele sisse ehitatud jahutus, mille eesmärk on vähendada soojusliikumisest tekkivat müra väljundsignaalis.

Spektromeetri täpne kostefunktsioon ei ole teada. Selle funktsiooni teadmine ei ole vajalik, kuna mõõdetava objekti paksuse arvutamiseks on vajalikud miinimumide asukohad spektris, mis ei sõltu kostefunktsioonist. Kõiki töö käigus mõõdetud spektreid on analüüsitud arvestamata kostefunktsiooni.

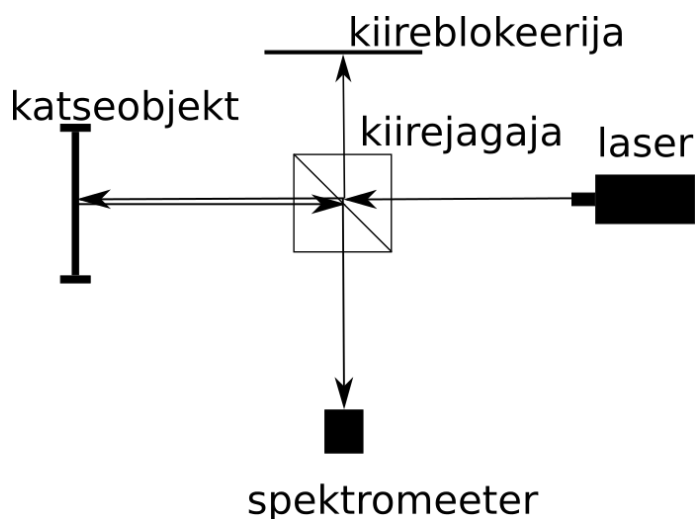
Spektromeetri väljundfailis salvestati väärtused nanomeetrites. Skaala konverteerimiseks sagedusalasse viidi iga lainepikkuse jaoks läbi teisendus. Intensiivsuse väärtuseid teisendamisel ei muudetud.

2.2 Optilise skeemi üldkirjeldus

Eksperimenti läbiviimine oli jaotatud kaheks. Esimeses osas mõõdeti tasapinnaliste objektide paksust spektraalse reflektomeetriaga ning saadud tulemusi kontrolliti koherentsikaardistamisega, et veenduda meetodi kasutatavuses ning täpsuses. Saadud kogemuste ja andmete põhjal viidi läbi eksperimenti teine osa, kus mõõdeti optilise kiu kaitsekihi paksust ainult spektraalse reflektomeetriaga.

Käesolevas töös mõeldakse spektraalse reflektomeetria all õhukeste kilede omaduste uurimist tagasipeegeldunud valguse spektrisse tekkinud muutuste abil. Antud töös keskendutakse kaitsekihi paksuse leidmisele.

Koherentsikaardistamise korral skaneeritakse interferomeetri ühes õla pikkust. Otsitakse peegli asukohtasid, kus on võimalik jälgida valge valguse interferentsi. Ühe katseobjekti korral peab leiduma vähemalt kaks interferentspilti, millest üks tekib esimese pinna peegeldusest ja teine katseobjekti sisepinna peegelduselt.



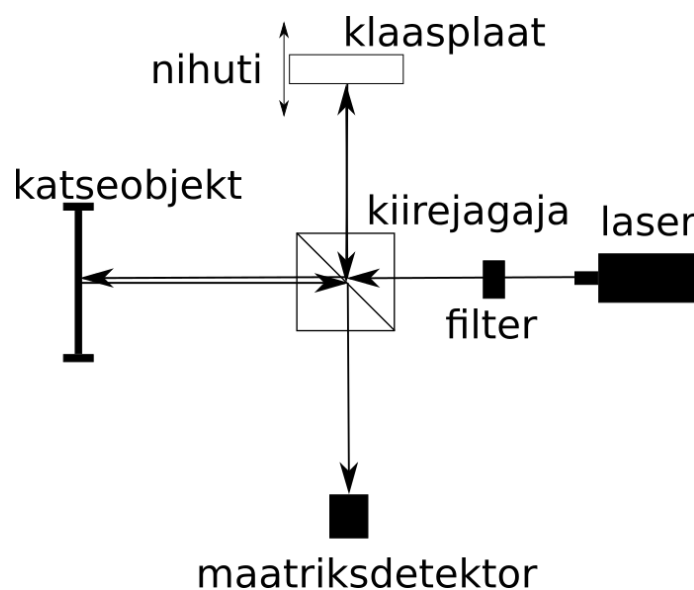
Joonis 2.2. Spektraalse reflektomeetria jaoks tasapinnaliselt katseobjektilt tagasipeegeldunud valguse spektri mõõtmise skeem.

Töö eesmärgi saavutamiseks seati laborisse üles Michelsoni interferomeeter. Kiirejagajana oli kasutusel kuup. See tagas, et mõlemal õlal oli optiline teepikkus ja kiirejagaja poolt tekitatud dispersioon võrdne. Kogu skeem oli asetatud stabiliseeritud optilisele lauale. Tulenevalt laseri kasutamisest mitmes eksperimenti skeemis korraga suunati klaasplaadi peegeldusega käesolevas töös läbiviidud eksperimenti ca 4% laseri väljundvalgusest.

Spektraalse modulatsiooni mõõtmise korral kaeti interferomeetri üks õlgadest kinni ning väljundisse asetati spektrimeeter. Vastava ülesehituse skeem on nähtav joonisel 2.2. Kiirejagaja eesmärk oli suunata tagasipeegelduv kiir väljundisse. Kasutatava lahenduse miinuseks oli, et kiirejagajas tekkivad lisapeegeldused suunavad osa laserivalgusest

väljundisse. Selleks, et oleks võimalik mõõta ilma mõjutusteta suunati valgus väljundisse nurga all.

Koherentsi kaardistamise korral oli kasutusel standartne Michelsoni interferomeeter (joonis 1.2). Võrdlusõlg oli nihutiga muudetav, mida lõtku vähendamiseks liigutati korraga ainult ühes suunas. Tulenevalt laserkiire väikesest ristlõike pindalast on silmaga võimatu näha tekkivat interferentspilti. Selle nägemiseks oli kasutusel CMOS elementidega maatriksdetektor. Tegemist oli Allied Vision Technologies firma poolt toodetud 5MPx (2588 x 1940 pikslit) maatriksdetektoriga GUPPY PRO F-503 [17]. Kaamera pilt kuvati arvutiekraanile kasutades programmeerimiskeeles *python2.7* kirjutatud koodi. Koherentsikaardistamise korral asetati laseri teele neutraalne filter, et vältida maatriksdetektori elementide üleküllastumist.



Joonis 2.3. Koherentsi kaardistamiseks kasutatud optiline skeem. Klaasplaadi liigutamisega skaneeriti õla pikkust, et leida asukoht, kus tekkiv käiguvahe on mõne lainepikkuse suurusjärgus.

Interferomeetri teises õlas kasutati peegli asemel paksu klaasplaati. See tagas selle, et mõlemast õlast tulenevad intensiivused olid võrdsed ning interferentspilti oli võimalik vaadelda. Kasutades peeglit ning nõrgendavat filtrit oleks olnud sobiva intensiivsuse saavutamine keeruline. Peab arvestama, et valgus läbib filtrit kaks korda. Lisaks tekivad ka lisapeegeldused, mis satuvad väljundisse. Klaasplaat pidi olema piisavalt paks, et kindlustada, et tekkivad interferentspildid on saadud paksu klaasi valitud pinna peegeldusest. Kui interferentspilt tekib klaasplaadi tagumiselt pinnalt, ei ole vaja arvestada selle murdumisnäitajaga, kuna loeb ainult suhteline kauguse muutus mitte absoluutväärtus.

2.3 Uuritava objekti paksuse arvutamine

Mõõdetava kihi paksust arvutatakse peegeldunud valguse spektrisse tekkivast modulatsioonist. Üks võimalus selle modulatsiooni matemaatiliseks kirjeldamiseks on kasutada Fourier pööret ja selle omadusi. Tulenevalt Fourier pöörde omadusest tekib ajalise nihke korral spektrisse perioodiline modulatsioon

$$x(x - \tau) \leftrightarrow e^{-i\omega\tau} X(\omega), \quad (2.1)$$

kus $x(x - \tau)$ -valguslaineline liikumise funktsioon aegruumis, $X(\omega)$ -valguslaineline liikumine sagedusruumis, τ -signaali ajaline viivis. [18]

Modulatsiooniperioodile sagedusruumis vastab $\Delta\nu$. See on seotud signaali ajalise viivisega

$$\tau = \frac{1}{\Delta\nu}. \quad (2.2)$$

Täpsust võimaldab tõsta mitme tekkiva miinimumi või maksimumi asukoha määramine ja nende põhjal keskmise modulatsiooni perioodi arvutamine. Samas annab mitme mõõtmistulemuse kasutamine ka võimaluse arvutada standardhälve ja seeläbi hinnata mõõtmisel tekkivat määramatust.

Teades mõõteobjekti poolt põhjustatud viivist saab välja arvutada selle optilise paksuse

$$\Delta = \frac{\tau c}{2}. \quad (2.3)$$

Valemis on kordaja $\frac{1}{2}$, kuna valgus läbib mõõdetavat kihti kaks korda. Selleks, et siit saaks arvutada tegelikku kihi paksust on vaja teada murdumisnäitajat n .

Kõikides materjalides sõltub valguse murdumisnäitaja lainepikkusest ning tulenevalt sellest on ka kõik ühest spektrist mõõdetud viivised natukene erinevad. Käesolevas töös on murdumisnäitajana kasutatud väärtust ühel kindlal lainepikkusel. Lainepikkusest sõltuvuse eiramine põhjustab väikese ebatäpsuse, mida hindame töö üldise eesmärgi raamistikus ebaoluliseks.

Optilisest teepikkusest saame leida tegeliku kihi paksuse

$$d = \frac{\Delta}{n} . \quad (2.4)$$

Saadud tulemust kontrolliti koherentsikaardistamise abil. Kasutades Michelsoni interferomeetrit ja lähtudes valge valguse interferentsi nõudest, et käiguvahe peab olema ainult paar lainepikkust, saab mõõta katseobjekti paksuse. Interferomeetri õla pikkust skaneerides leiti kaks nihuti asukohta x_1 ja x_2 , kus oli võimalik jälgida valge valguse interferentsi. Nende asukohtade alusel saab arvutada objekti paksuse

$$d = \frac{|x_1 - x_2|}{n} . \quad (2.5)$$

Koherentsi kaardistamiseks kasutatava mikromeetri täpsus on $10\mu\text{m}$. See tähendab, et kõige paremal juhul on võimalik hinnata kaardistava objekti paksust täpsusega $\frac{5\mu\text{m}}{n}$. Erinevatel meetoditel saadud mõõtmistulemused peavad langema kokku mõne mikromeetrise täpsusega, et saaks veenduda kasutatava meetodi korrektsuses.

2.4 Tasapinnalise objekti paksuse mõõtmine

Käesoleva töö esimeses osas uuriti meetodi töötamist ja kontrolliti rakendatavust õhukeste tasapinnaliste objektide korral. Alustades tasapinnalistest objektidest saab keskenduda meetodi uurimisele. Tehnilised keerukused, mis kaasnevad silindrilise katseobjektiga, jäävad hilisemasse faasi. Saades lihtsasti mõõdetavatelt objektidelt usaldusväärsed paksuste väärtused, on võimalik edasi liikuda keerulisemate objektide juurde.

Mõõtmisteks kasutati kahte erinevat katseobjekti. Nendest esimeseks objektiks oli paksusega $d = 50\mu\text{m}$ klaasplaat. Teise objektina uuriti kilest kiirejagajat paksusega $d = 2\mu\text{m}$. Sellised katseobjektide paksused annavad võimaluse võrrelda meetodi rakendatavust suhteliselt laias piirkonnas. Klaasplaat on piisavalt paks, et seda saaks mõõta interferomeetriga.

Klaasplaat pakusega $d = 50\mu\text{m}$ oli toodetud ettevõtte Precision Micro-Optics poolt, tootekoodiga PWSB-26852. Tegemist oli mõlemalt pinnalt optilise kvaliteediga lihvitud kvartsklaasist plaadiga. [19]

Kilest kiirejagaja on tehtud õhukesest nitrotselluloosist, mille paksuse ebatäpsus tootja andmetel on 0,005. See on toodetud ettevõtte Edmund Optics poolt, tootekoodiga 39-486. [20]

2.5 Optilise kiu kaitsekihi paksuse määramine

Klaaskiudude mõõtmiseks tuli optilisse skeemi viia sisse muudatus. Otse laserikiire pealelangemisel ei tekkinud piisavalt intensiivset tagasipeegeldust, et seda oleks võimalik spektromeetriga mõõta. Selle probleemi lahendamiseks asetati mõõdetava kiu ette akromaatne lääts fookuskaugusega $f = 50\text{ mm}$. Lääts fokuseeris laserikiire optilise kiu peale ning muutis tagasipeegeldunud valguse uuesti kollimeerituks. Selleks, et oleks võimalik lääts soovitud kaugusele sättida, oli mõõteobjekt asetatud nihutile. Kasutatav lääts tekitas väljundisse piisavalt suure valguslaigu, mida oli võimalik spektromeetri sisendavasse juhtida. On väga oluline, et kasutatav lääts oleks akromaatne. Katsetuste alguses prooviti eksperimenti läbi viia nn tavalise silinderläätsiga, kuid selle korral ei olnud võimalik jälgida väljundspektris modulatsiooni.

Tasapinnaliste objektide korral on täpselt teada nende paksused. Klaaskiudude puhul on teada ainult hinnanguline kaitsekihi paksus. Kiuga tuleb kaasa info katte läbimõõdust ning kogu kiu läbimõõdust. Samas ei pruugi olla kaitsekiht ühtlase paksusega, mis teeb tulemuse korrektsuse hindamise keeruliseks.

Käesolevas töös uuriti firma Oplatek Group OY poolt valmistatud optilisi kiude. Esimese kiu, tootja märgistus DG310.05 SWUI 1.1, kogupaksus oli $220\mu\text{m}$, millest $200\mu\text{m}$ on sisemine osa, südamiku ja kattekihi läbimõõt. Seega, kaitsekihi paksus oli spetsifikatsiooni kohaselt umbes $10\mu\text{m}$. Teine kiud, tootja märgistus KUITU 20.05.11 SWU 1.1, oli $440\mu\text{m}$ läbimõõduga, millest sisemine osa $400\mu\text{m}$. Seega kaitsekihi paksus $20\mu\text{m}$. Mõlema kiu korral oli kaitsekihi murdumisnäitaja 1,5.

Peatükk 3

Tulemused ja analüüs

Käesolevas peatükis antakse ülevaade eksperimendis saadud tulemustest ning tehakse nende alusel järeldusi spektraalse reflektomeetria kohta. Eraldi on välja toodud tasapinnaliste objektidega meetodi katsetamine ning töö eesmärgi täitmiseks vajalikud optiliste kiudude mõõtmised. Viimaks antakse hinnang meetodi rakendatavusele tööstuses ning soovitused edasiseks uurimiseks.

Töös konstrueeriti optiline süsteem vajalike mõõtmiste läbiviimiseks. Mõõtmisi tehti kahe erineva meetodiga, spektraalse reflektomeetriaga, mille korral mõõdeti spektrisse tekkiva modulatsiooni perioodi, ja koherentsikaardistamisega, mis võimaldas valge valguse koherentsi abil määrata valguskimbu katseobjekti läbimisel lisanduvat optilist teepikkust. Mõõtmisandmetest oli võimalik arvutada õhukeste kilede paksusi. Katseobjektide spetsifikatsioonid võimaldasid hinnata mõõtemetodite täpsust ja rakendamispiire. Töö käigus kujundati hinnang spektraalse reflektomeetria rakendatavusele tööstuses optiliste kiudude kaitsekihtide paksuse määramiseks, kus tuleb arvestada paljude erinevate faktoritega, mida laboritingimustes ei ole vaja arvestada.

Igal katseobjektil mõõdeti spektrit neljast erinevast punktist. Mõõdetud spektrite uurimisel valiti välja kuni 11 andmepunkti. Valitud punktide alusel arvutati tekkinud modulatsiooni periood. Kokku oli kasutusel kuni 10 modulatsiooniperioodi väärtust, mille alusel arvutati keskmine ja standardhälve. Soovitud arvu mõõtepunktide puudumisel ühes spektris kasutati maksimaalset võimalikku arvu.

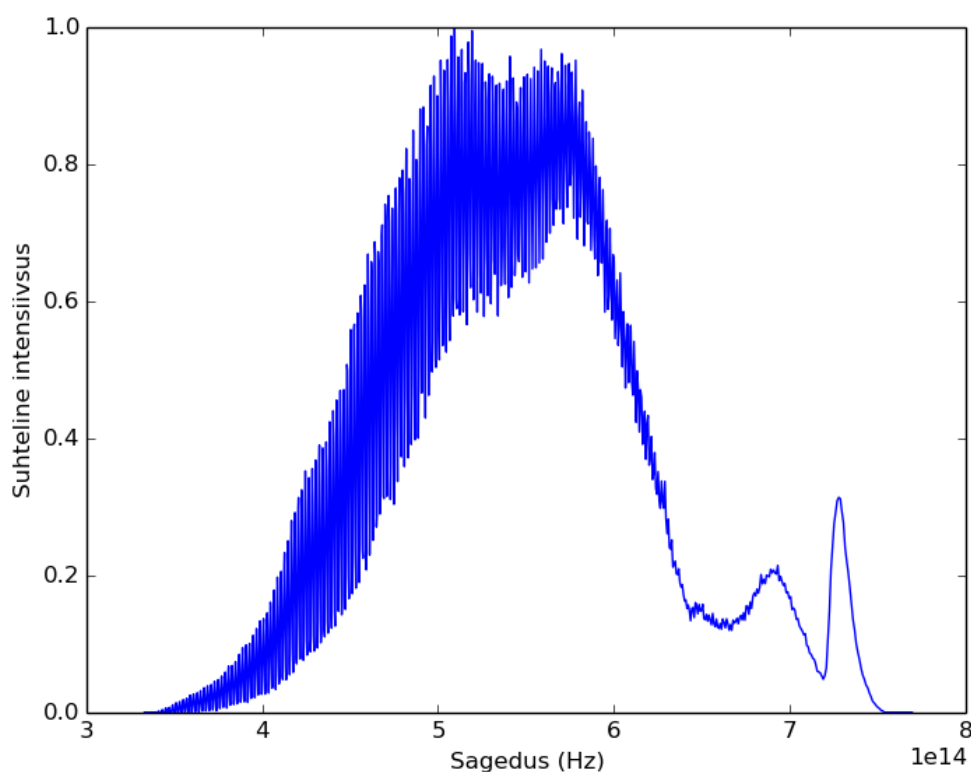
Modulatsiooniperioodi arvutamiseks kasutati spektrisse tekkivaid miinimume. Nende asukohta on jooniselt lihtsam määrata kui ühe kitsa maksimumi asukohta. Segava tegurina on spektris laiad miinimumid, millega toime tulemiseks leiti keskmine väärtus üle kogu miinimumi laiuse.

Andmete analüüsiks kasutati programmeerimiskeeles *python3.4* kirjutatud programmi ning tabelarvutustarkvara *LibreOffice Calc*. Kirjutatud programmi kasutati spektrometri

väljundfailist andmete lugemiseks ning graafikute joonistamiseks. Andmete analüüsiks ja graafiliseks kujutamiseks kasutati *python* lisapakette *numpy* ja *matplotlib*.

3.1 Tasapinnalise objekti paksuse määramine

Esimesena teostati mõõtmised 50 μm paksuse klaasplaadiga. Katseobjektilt peegeldunud valguse spekter on näha joonisel 3.1. Mõõdetud spektritest arvutatud paksused on näha tabelis 3.1. Saadud mõõtmistulemuste kaalutud keskmine on 54,4 μm

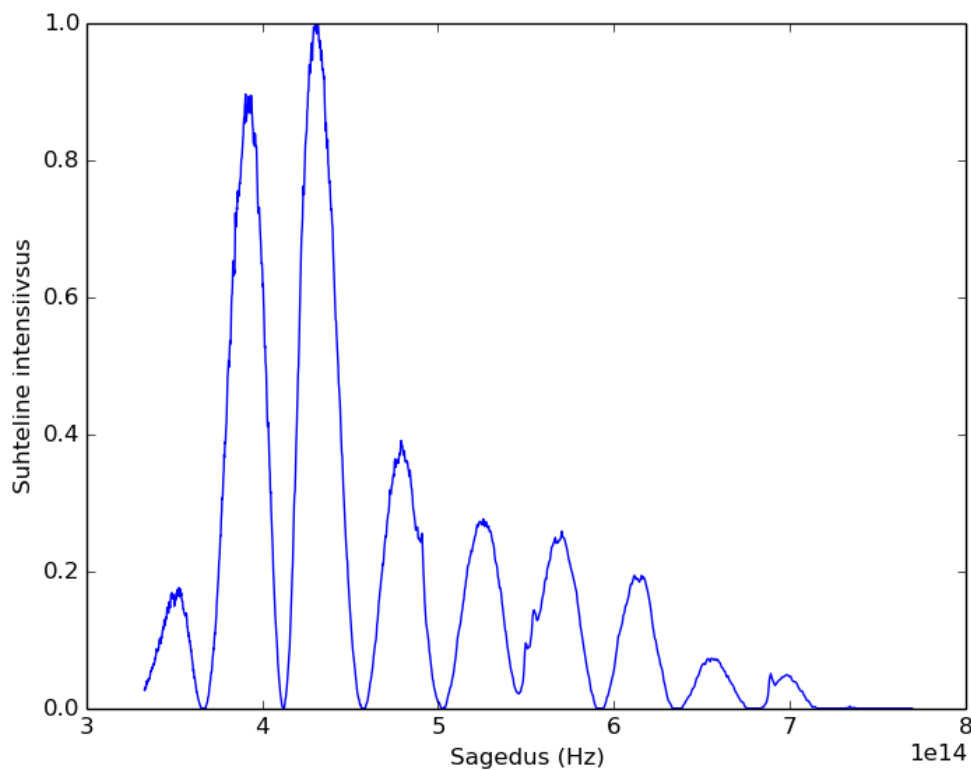


Joonis 3.1. 50 μm paksuselt klaasplaadilt peegeldunud valguse spekter

Michelsoni interferomeetriga koherentsikaardistamisega kontrollides oli võimalik jälgida valge valguse interferentspilti mikromeetri kruvi väärtuste 3,82 mm ja 3,90 mm juures. Sellest saab arvutades valemit (2.5) kasutades plaadi optiliseks paksuseks 0,08 mm, mille murdumisnäitajaga läbi jagades saame tegelikuks paksuseks 0,057 mm.

Saadud tulemused langevad kokku piisava täpsusega arvestades Michelsoni interferomeetri nihuti jaotise suurust. Lisaks langeb mõlema meetodiga saadud tulemus samasse suurusjärku tootjapoolse infoga. Saadud tulemus annab lootust, et valitud meetod võib olla sobiv õhukeste kilede paksuse määramiseks.

Vaadates joonist 3.1 on näha, et modulatsioon on väga tihe. Seega on mõõdetud klaasplaadi paksus kasutatava spektromeetri jaoks ülemiseks piiriks paksuse mõõtmisel. Paksemate objektide mõõtmiseks on vaja kasutusele võtta kõrgema lahutusega spektromeeter. Käesolevas töös see probleemiks ei kujune, kuna kõikide mõõdetavate objektide paksused on sellest väiksemad.



Joonis 3.2. Õhukese kiirejagaja membraani peegelduse spekter.

Kilest kiirejagaja peegelduse spektrit mõõdeti neljast erinevast punktist. Mõõtmiste andmetest arvatud paksused on toodud tabelis 3.1 Joonisel 3.2 on näha ühte salvestatud peegelduse spektrit. Mõõdetud spektritest arvatud kaalutud keskmiseks paksuseks saadi $2,29\mu\text{m}$. Saadud tulemus langeb kokku tootja poolse infoga, mis näitab, et sellisel meetodil paksuse arvutamine on korrektne.

Kilest kiirejagaja paksuse määramine kasutatava interferomeetriga on keeruline. Kasutusel oleva seadme resolutsioon on liiga väike, et määrata kile paksust piisava täpsusega. Lisaks hakkab õhukeste objektide mõõtmise korral mõõtmistulemust mõjutama interferomeetri õlgade stabiilsus ja õhu liikumine.

Kirjeldatud esimeses mõõtmiste etapis läbiviidud katsete tulemuste analüüs näitab, et spektraalse reflektomeetriaga paksuse määramise meetod annab usaldusväärse tulemuse. Samas peab arvestama, et selle kasutamine on piiratud suhteliselt väikesele katseobjektide paksuse vahemikule. $50\mu\text{m}$ paksemate kihtide mõõtmine ei õnnestu, kuna tekkiv

Tabel 3.1. Tasapinnaliste objektide paksuse mõõtmise iga korra keskmine väärtus ja standardhälve

Mõõtmine	Kiirejagaja		Klaasplaat	
	Keskmine	Standardhälve	Keskmine	Standardhälve
1.	2,37 μm	0,33 μm	54,8 μm	4,35 μm
2.	2,27 μm	0,18 μm	54,2 μm	2,22 μm
3.	2,27 μm	0,19 μm	54,7 μm	3,94 μm
4.	2,29 μm	0,08 μm	54,4 μm	3,74 μm
Kaalutud keskmine	2,29 μm	0,07 μm	54,4 μm	1,60 μm

modulatsioon muutub liiga väikseks ja ei ole enam eristatav üldisest müra. Õhemaks on võimalik minna kasutades sama mõõteaparatuuri, kuid modulatsioon kasvab kiiresti laiemaks kui kasutatav spektrivahemik. Väga õhukeste kilede mõõtmisel tuleb kasutada aiemas spektri piirkonnas tundlikku spektromeetrit, või analüüsida tundlikkuse tõstmist miinimumide asukoha määramise põhjal [21].

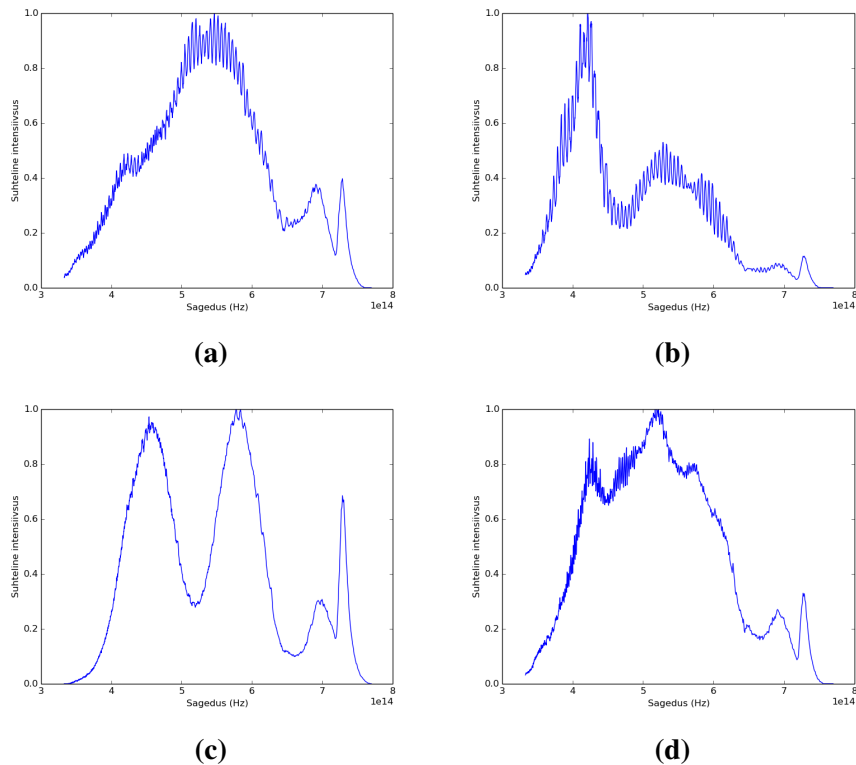
3.2 Optilise kiu kaitsekihi paksuse mõõtmine staatilise kiu korral

Tasapinnaliste objektide uurimine näitas, et spektraalne reflektomeetria võiks olla sobiv meetod optilise kiu kaitsekihi paksuse määramiseks. Teades, et meetod on sobiv antud töös uuritavate paksuste vahemikus, jätkati optiliste kiudude kaitsekihtide paksuste määramisega. Ülesanne, mis tulenevalt katseobjekti silindrilisest geomeetriast, on keerulisem. Kogumaks objekti tagasipeegelduselt väljundisse piisavalt tugevat valgust, asetati katseobjekti ette akromaatne lääts. Katseobjektile koondati langev valgus ning koguti peegeldunud valgus ühe ja sama läätsega. Lääts kasutamine mõjutab spektri kuju väljundis. Muutes optilise kiu kaugust läätsest on võimalik jälgida spektri kuju muutumist, kuid modulatsiooni ja selle periood jäävad muutumatuks.

Tabel 3.2. Klaaskiudude paksuse mõõtmise keskmine väärtus ja standardhälve igas mõõtepunktis

Mõõtmine	KUITU 20.05.11		DG310.05	
	Keskmine	Standardhälve	Keskmine	Standardhälve
(a)	19,3 μm	1,12 μm	24,1 μm	3,14 μm
(b)	18,6 μm	0,90 μm	5,29 μm	0,18 μm
(c)	0,99 μm	0,62 μm	5,09 μm	0,24 μm
(d)	39,9 μm	3,27 μm	17,9 μm	1,64 μm

Uuritavata kiudude paksused olid umbes 40cm. Mõlemalt optiliselt kiult mõõdeti peegeldunud valguse spektrit neljas erinevas, suvaliselt valitud punktis. Optilise kiu



Joonis 3.3. Optiliselt kiult KUITU 20.05.11 neljast erinevast kohast mõõdetud peegeldunud valguse spektrid.

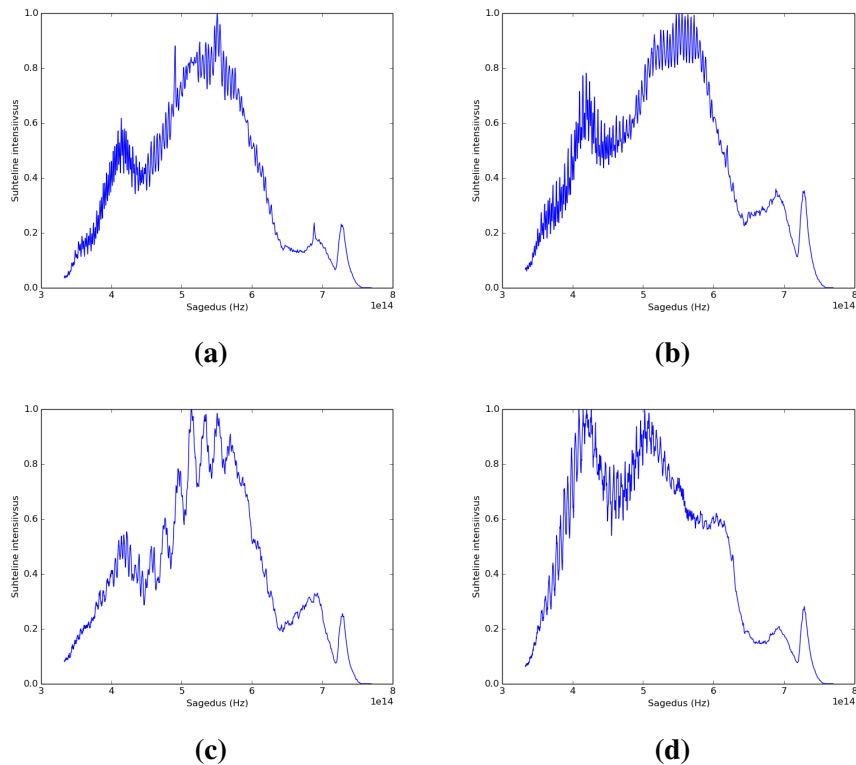
KUITU 20.05.11 mõõdetud spektrid on nähtaval joonisel 3.3 ja kiu DG210.05 spektrid on toodud joonisel 3.4. Spektrite põhjal arvatud reaalsed paksused on toodud tabelis 3.2.

Tulemuste võrdlemisel selgub, et mõõtmistest saadud väärtused ei lange kokku, vaid hajuvad laias vahemikus. olles õppinud meetodit ja sele rakenduspiire tundma tasapinnaliste objektide korral võib väita, et saadud tulemused on tingitud kiu kattekihi ebahürtlusest, mitte meetodi ebastabiilsusest. Seega võib järeldada, et optiliste kiudude kaitsekihtide paksused erinevad suurel määral kogu kiu ulatuses. Leidub isegi kohti, kus kihi paksus on väga õhukene, mistõttu sellest kohast on kiud mehaaniliselt palju hapram. Lisaks töö eesmärgi täitmisele meetodi eduka katsetamisega optiliste kiudude peal sai kinnitust ka fakt, et ühtlase kaitsekihi valmistamine on tõepoolest keeruline väljakutse.

3.3 Soovitused ja hinnang meetodi edasiarendamiseks

Tasapinnaliste objektide mõõtmisega veenduti, et spektraalse reflektomeetriaga on võimalik mõõta õhukeste kilede optilisi paksusi. Meetodi tööstuslik kasutamine perspektiivikas, kuid selleks on vaja ära lahendada mõningad probleemid.

Edasist uurimist vajab meetodi täpsus ning seda mõjutavad tegurid. Käesolevas töös



Joonis 3.4. Optiliselt kiult DG310.05 peegeldunud valguse spektrid.

jäeti see aspekt kõrvale ning hinnati empiiriliselt, kas kahe erineva meetodiga saadud tulemused on mõistlikuse piires kokkulangevad. Tööstuslikul rakendamisel on väga oluline mõista, mis on meetodi veapiirid ning millised tingimused mõjutavad täpsust.

Töös kasutatud skeemi abil oli võimalik mõõta kiu paksust ainult sellisel juhul kui see on staatilisel paigal. Kiudude valmistamine ehk tõmbamine toimub suurel kiirusel. Selle protsessi ajal ei ole kiud stabiilne vaid liigub väikeses ulatuses ka külgsuunaliselt. Tulenevalt sellest peab antud meetodi rakendamiseks tööstuses olema võimalik teha mõõtmisi laiemas ruumipiirkonnas või leidma mõne teise tehnilise lahenduse mõõtmiste läbiviimiseks. Lisaks on uurimata, kuidas mõjub katseobjekti liikumine mõõtmistulemusele.

Käesolevas eksperimendis kasutati valgusallikana superkontiinumlasertit, mille hind on 100000 euro suurusjärgus. See on liiga kõrge hind, et seda oleks mõistlik kasutada tööstuslikes rakendustes Samuti ei vajata spektraalse reflektomeetria jaoks tingimata ruumiliselt koherentset valgusallikat. Seega saab rakendada mistahes laiaribalist valgusallikat, soovitatavalt sileda spektri ja hea kiirekvaliteediga lahendust. Lisaks gaaslahenduslampidele on võimalikud kandidaadid ka laia spektriga diodid või koherentse väljundiga laserergastatud lambid.

Kokkuvõte

Optiliste kiudude kasutamine on kaasa toonud revolutsiooni telekommunikatsioonis, kus valdav osa pikamaa andmevahetusest toimub üle optiliste sideliinide. Samal ajal leiavad optilised kiud kasutust ka teistes rakendustest nagu näiteks rõhu- ja paindesensoritena, fotokeemias, superkontiinumlasertes ning mitmel pool mujal. Viimati nimetatud rakendustes kasutatakse eriotstabelisi kiude. Kiudude tootmisel on väga oluline, et kaitsekiht oleks ühtlane ja seeläbi tagaks kaitse mehaaniliste vigastuste vastu.

Töö eesmärk oli mõõta optilise kiu kaitsekihi paksust kasutades spektraalset reflektomeetriat. Mõõtes ära spektrisse tekkiva modulatsiooni perioodi on võimalik arvutada katseobjekti optiline paksus. Tulemuse läbijagamisel murdumisnäitajaga saadi tegelik paksus. Saadud tulemusi kontrolliti Michelsoni interferomeetriga kasutades valge valguse koherentsikaardistamist.

Meetodi rakendamise piirid ja eksperimentaalsed iseärasused tehti kindlaks hästi kirjeldatud tasapinnaliste katseobjektide abil. Eksperimendi tulemusena veenduti, et olemasolevate tehniliste vahenditega on võimalik teha mõõtmisi vahemikus $2\mu\text{m}$ kuni $50\mu\text{m}$. Vahemik, mis oli sobiv mõõdetavate optiliste kiudude jaoks. Edukad tulemused tasapinnaliste objektidega tekitasid aluse, millelt edasi liikuda keerulisema kujuga objektide juurde.

Käesolevas töös uuritud meetodit on võimalik edukalt kasutada optiliste kiudude kaitsekihtide paksuse määramiseks. Edasised arengud peaksid täpsustama mõõtmistel saavutatavat täpsust ning uurima seda peamiselt mõjutavaid tegureid. Tööstuslikult kasutamiseks on vaja ehitada süsteem, mis on võimeline mõõtma optilist kiudu selle valmistamise ajal.

Tänuavaldused

Soovin tänada oma juhendajad Sandhra-Mirella Valdmata ja Heli Lunknerit, kes on kannatlikult aidanud mind töö valmimise juures. Tänuõnad ka Andreas Valdmannile, kes kriitilistel hetkedel aitas lahendada kõige keerulisematenä tunduvaid probleeme, ning laborikaaslastele Valle Morelile, kellega meil oli põnev üheskoos laboris mõõtmisi teha.

Soovin tänada ka kõiki kursusekaaslast, sõpru ja perekonda, kes on mulle olnud toeks bakalaureuseõpingute jooksul. See on olnud suurepärane kogemus.

Karl Reinkubjas

Kasutatud kirjandus

- [1] T. P. Pearsall. *Photonics essentials*. McGraw-Hill New York, NY, 2003.
- [2] E.Šugai, K. Watabe, Kazunori Yamaga, and Seiichi Fujita. Optical fiber sensor, February 7 2001. US Patent App. 09/779,005.
- [3] N. J. Peill and M. R. Hoffmann. Development and optimization of a tio₂-coated fiber-optic cable reactor: photocatalytic degradation of 4-chlorophenol. *Environmental science & technology*, 29(12):2974–2981, 1995.
- [4] J. M. Dudley and J. R. Taylor. *Supercontinuum generation in optical fibers*. Cambridge University Press, 2010.
- [5] H. G. Tompkins and W. A. McGahan. *Spectroscopic ellipsometry and reflectometry: a user's guide*. Wiley, 1999.
- [6] F. A. Jenkins and H. E. White. *Fundamentals of optics*. Tata McGraw-Hill Education, 1957.
- [7] A. Nussbaum and R. A. Phillips. Contemporary optics for scientists and engineers. *Contemporary Optics for Scientists and Engineers by Allen Nussbaum, Richard A. Phillips New Jersey: Prentice Hall, INC, 1976, 1976*.
- [8] E. Hecht. *Optics*. Pearson Education Limited, 4 edition, 2014.
- [9] Polytec GmbH. File:Michelsoni interferomeetri skeem.png. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michelsoni_interferomeetri_skeem.png. Kasutatud 12.05.2017.
- [10] L. Mandel and E. Wolf. Coherence properties of optical fields. *Reviews of modern physics*, 37(2):231, 1965.
- [11] S. A. Akhmanov and S. Yu Nikitin. *Physical optics*. Clarendon Press, 1997.
- [12] O. Heavens. *Optical properties of thin solid films*. Courier Corporation, 1991.
- [13] A. Ghatak and K. Thyagarajan. *An introduction to fiber optics*. Cambridge university press, 1998.

- [14] A. W. Snyder and J. Love. *Optical waveguide theory*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [15] M. i Ponsoda, J. Joan, et al. Analysis of photodarkening effects in ytterbium-doped laser fibers. 2013.
- [16] NKT Photonics A/S. Fianium WhiteLase supercontinuum lasers. <http://www.nktphotonics.com/product/fianium-whitelase>. Kasutatud 01.04.2017.
- [17] Allied Vision Technologies GmbH. GUPPY PRO F-503. <https://www.alliedvision.com/en/products/cameras/detail/Guppy%20PRO/F-503.html>. Kasutatud 14.05.2017.
- [18] H. Hsu. *Schaum's outline of theory and problems of signal and systems*. McGraw-Hill, 1995.
- [19] Precision Micro-Optics. Optical substrates. http://www.pmoptics.com/optical_substrates.html. Kasutatud 26.04.2017.
- [20] Edmund Optics Inc. 6.2mm Clear Aperture 8R/92T, Pellicle Beamsplitter. <https://www.edmundoptics.com/optics/beamsplitters/plate-beamsplitters/pellicle-beamsplitters/39486/>. Kasutatud 01.04.2017.
- [21] P. Hlubina, J. Luňáček, and D. Ciprian. The effect of silicon substrate on thickness of sio₂ thin film analysed by spectral reflectometry and interferometry. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 95(4):795–799, 2009.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Karl Reinkubjas,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

**Spektraalse reflektomeetria kasutamine optilise kiu kaitsekihi paksuse
määramiseks,**

mille juhendajad on Heli Lukner Ph.D ja Sandhra-Mirella Valdma MSc.,

- (a) reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - (b) üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
 3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartu, 17. mai 2017. a.